

У статті розглядаються технічні засоби отримання інформації щодо параметрів морської суспензії. Наведено результати аналізу існуючих методів вимірювання концентрації та розмірного складу суспензії. Описано розроблений метод, що дозволяє одночасно отримувати дані про концентрацію і розмірний склад суспензії за допомогою обробки фотозображень морського середовища. Наведено отримані протягом лабораторних випробувань дані щодо розмірного складу та концентрації суспензії

Ключові слова: технічні засоби, концентрація суспензії, розмірний склад часток, транспорт донних наносів, фотозображення

В статье рассматриваются технические средства получения информации, о параметрах взвешенного в морской воде вещества. Приведены результаты анализа существующих методов измерения концентрации и размерного состава взвеси. Описан разработанный метод, позволяющий одновременно получать данные о концентрации и размерном составе взвешенного в морской воде вещества, с помощью обработки фотоизображений среды. Приведены полученные в ходе лабораторных испытаний данные о размерном составе и концентрации взвеси

Ключевые слова: технические средства, концентрация взвеси, размерный состав частиц, транспорт наносов, фотоизображения

СРЕДСТВА ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПАРАМЕТРАХ ВЗВЕСИ, ОСНОВАННЫЕ НА ОБРАБОТКЕ ФОТО- ИЗОБРАЖЕНИЙ

Д. А. Антоненков

Инженер, соискатель

Морской гидрофизический институт
ул. Капитанская, 2, г. Севастополь

E-mail: science@arkada.com.ua

1. Введение

В настоящее время, особое внимание уделяется созданию новых технических средств и информационных технологий для контроля состояния водной среды. Решение прикладных задач, таких как строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений, создание проектов защиты берегов, обеспечение экологической безопасности и рекреационного режима пляжей, невозможно без изучения процессов перемещения наносов в береговой зоне [1]. Одними из наиболее важных параметров, определяющих движение наносов, являются концентрация и размерный состав взвешенного в воде вещества.

Экспериментальные данные о концентрации взвеси и ее размерном составе в прибрежной зоне позволяют исследовать процессы перемещения донных наносов и оценивать потоки взвешенного вещества в исследуемой акватории, а также осуществлять верификацию существующих моделей этих процессов.

Выбор достоверного способа измерения концентрации и размерного состава взвешенного вещества *in situ*, является одной из основных задач, без решения которой невозможно изучение процессов перемещения взвешенного вещества и донных наносов.

2. Методы и технические средства получения информации о параметрах взвешенного в морской воде вещества.

Для оценки текущего состояния проблемы был выполнен анализ основных методов и приборов из-

мерения концентрации и размерного состава взвеси, применяемых в настоящее время. В рамках анализа были рассмотрены следующие методики и технические средства:

- Измерение размерного состава и концентрации взвеси методами фильтрации и сепарации.
- Измерение объёмной концентрации взвеси по пульсациям электропроводности морской воды [2].
- Измерение размеров частиц с помощью метода динамического рассеяния света [3, 4].
- Методика определения концентрации взвеси с использованием измерителя коэффициента ослабления направленного света. Метод флуктуации интенсивности света [5].
- Нефелометрические методы определения концентрации и размерного состава взвешенного вещества [6].
- Оптико-электронные приборы для определения параметров, характеризующих состояние планктона, цитометры [7].

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что существующие методы определения концентрации и размерного состава взвеси не позволяют реализовать одновременное измерение концентрации и размерного состава взвешенного в морской воде вещества. Большинство применяемых на сегодняшний день методов имеют возможность проведения исследований только в лабораторных условиях, а те из них, которые реализованы в приборах для измерений *in situ*, невозможно использовать в прибрежной зоне, в области высоких концентраций взвеси и неоднородного размерного состава (нефелометры), либо они дают усред-

ненные данные о размерном составе (турбидиметры). Было установлено, что для получения информации о концентрации и размерном составе взвеси наиболее перспективным является разработка и техническая реализация метода, основанного на получении и обработке фотоизображений взвешенного в морской воде вещества.

Применяемые в настоящее время методы исследования параметров взвеси, позволяющие определить размерный состав и концентрацию взвешенного в воде вещества, основаны на анализе отобранных проб в лабораторных условиях с использованием микроскопов или другой специализированной техники. Такие методы существенно затрудняют проведение непрерывного мониторинга морской среды, так как они связаны с большими затратами времени на отбор проб, их подготовку для анализа и непосредственно на проведение самого анализа.

В связи с этим необходимо создание информационно-измерительных комплексов, важнейшими элементами которых являются приборы для измерения концентрации и размерного состава взвешенного в воде вещества, позволяющие проводить измерения *in situ*.

Основная цель работы заключается в том, чтобы показать разработанный метод определения параметров взвешенного в воде вещества, основанный на получении и специальной обработке мгновенных фотоизображений водной среды.

Поставленная цель реализуется путем решения следующих задач:

1. Анализ современных средств и методов для определения концентрации и размерного состава взвешенного в воде вещества.
2. Разработка технических требований и аппаратная реализация метода получения фотоизображений взвешенного в воде вещества.
3. Разработка и создание специализированного испытательного стенда для апробации метода в условиях приближённых к естественным.
4. Проведение экспериментальной отработки метода.

3. Основные особенности технической реализации метода определения параметров взвешенного в воде вещества, основанного на обработке мгновенных фотоизображений водной среды

Получение осреднённого вертикального распределения концентрации взвеси и её размерного состава, необходимых для последующего расчета потоков взвеси, в условиях чрезвычайно высокой изменчивости этих характеристик возможно только через определение их мгновенных значений и последующего осреднения за достаточно большой интервал времени.

Сложный характер процессов прибрежной зоны моря, подлежащих экспериментальному изучению, накладывает достаточно жесткие требования к техническим средствам измерения, накопления и обработки информации.

Процесс натурных исследований параметров взвешенного в морской воде вещества должен включать в себя [8]:

- определение мгновенных значений концентрации и размерного состава взвеси в ряде точек по вертикали;
- осреднение, например, за 0,5–2 часа (период квазистационарного волнения) значений концентрации и размерного состава взвеси;
- определение размерного состава частиц размером от 80 до 400 мкм. Частицы, размер которых попадает в данный диапазон, составляют основную массу донных осадков и вносят наиболее значимый вклад в транспорт наносов.

В соответствии с этим, были определены основные технические требования к разрабатываемому прибору:

1. Требования к быстродействию.

Время регистрации процесса порядка 4 мкс. Это требование обусловлено скоростью движения частиц, которая при волнении может достигать нескольких метров в секунду. Частица взвеси при движении со скоростью 2 м/с пройдет расстояние 1 мкм за время, равное 0,5 мкс. Для того, чтобы избежать такого эффекта, как «смазывание изображения», и точности определения размеров частиц порядка десяти процентов, частица размером 80 мкм должна сместиться не более чем на 8 мкм. Таким образом, необходимо получение мгновенных снимков частиц взвеси со временем регистрации процесса порядка 4 мкс.

2. Требования к оптической части.

Разрешение объектива не менее 50 Лр/мм. Глубина резко изображаемого пространства – 500 мкм. Реализация данных требований позволит получить резкое изображение частиц тонкого переднего слоя и избежать взаимного затенения частиц. Передача изображения в масштабе 1:1.

3. Требования к регистрирующему устройству.

Размер светочувствительного элемента не более 8x8 мкм. При условии, что объектив проецирует изображение частицы на поверхность матрицы в соотношении 1:1, учитывая погрешность квантования ~10 %, ее изображение должно занимать 10 пикселей размером 8x8 мкм (для минимального размера частиц 80 мкм).

В соответствии с техническими требованиями, описанными выше, был разработан специализированный прибор – фоторегистратор. Конструктивная схема фоторегистратора представлена на рис. 1.

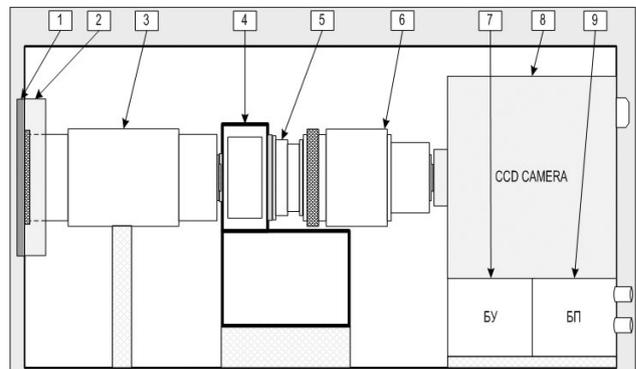


Рис. 1. Конструктивна схема фоторегистратора

Принцип действия прибора заключается в следующем: после включения прибора, по команде опера-

Таблица 1

Основные характеристики оптического блока

Характеристики	Значение
Фокусное расстояние объектива, мм	68
Относительное отверстие	1:3.5
Увеличение	1:1
Размер поля зрения в плоскости изображений (диагональ кадра), мм	26
Спектральный диапазон, нм	480–660
Разрешение по полю, не менее, лин. / мм	110
Дисторсия, не более	1 %
Виньетирование, не более	15 %
Передний рабочий отрезок, мм	48–50
Обще габариты длина/ диаметр, мм	155–165/60
Крепление	C-Mount

тора или в автоматическом режиме, блок управления (7) формирует управляющие синхроимпульсы для запуска затворного модуля с электронно-оптическим преобразователем (ЭОП) (4), системы импульсной подсветки (2) и регистрирующей камеры (8) согласно разработанному программному обеспечению. Запуск импульсной подсветки осуществляется синхронно с электронно-оптическим преобразователем. Изображение частиц, расположенных непосредственно перед иллиминатором (1), проецируется через специализированный объектив (3) на фотокатод электронно-оптического преобразователя, затвор которого в этот момент открывается на заданное время, равное времени экспозиции кадра – 4 мкс. В течение данного времени на выходном экране ЭОП формируется итоговое изображение. С экрана электронно-оптического преобразователя усиленное изображение через адаптер (5) и оптический соединитель (6) переносится на светочувствительную матрицу специализированной камеры, которая, работая в ждущем режиме, к данному моменту переходит в режим регистрации изображений. Время регистрации выбирается немного больше времени послесвечения люминофора электронно-оптического преобразователя. Это объясняется тем, что за это время (для люминофора Р-20 и Р-43 оно равно 1...3 мс) накапливаются все сигнальные фотоны, и дальнейшее накопление «собирает» только фоновый шум. Далее полученные данные обрабатываются аппаратным обеспечением камеры, формируя на выходе файл изображения. Питание всех компонентов прибора осуществляется встроенным блоком питания (9) [9].

Фоторегистратор состоит из следующих элементов и блоков.

1. Блок проецирования изображений. Основными элементами данного блока являются плоскопараллельный иллиминатор и специализированный репродукционный объектив высокого разрешения, объединенные в один блок. Основная задача данного блока состоит в том, чтобы сфокусировать изображение частиц, располагающихся непосредственно перед иллиминатором в слое толщиной 500 мкм, на поверхность фотокатода электронно-оптического преобразователя, обеспечив при этом резкость спроецированного изображения.

Оптическая схема данного блока в объемном виде приведена на рис. 2.

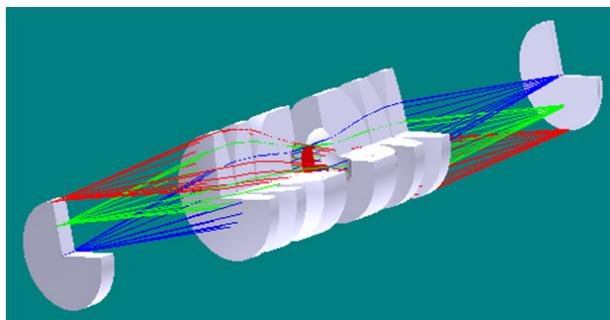


Рис. 2. Объемная модель оптического блока

Основные характеристики оптического блока представлены в табл. 1.

2. Электронно-оптический преобразователь с затворным модулем. Согласно техническим требованиям, чтобы избежать эффекта «смазывания изображений» и иметь точность определения размеров частиц порядка десяти процентов, нужно обеспечить время регистрации процесса порядка 4 мкс. Для получения мгновенных фотоизображений взвеси с таким временем экспозиции необходимо применение специализированных технических средств, так как стандартные ССD матрицы с электронным затвором не способны реализовать подобные выдержки. В разрабатываемом приборе данная проблема решается при помощи электронно-оптического преобразователя, используемого как быстродействующий электронный затвор. Электронно-оптический преобразователь состоит из фотокатода, микроканальной пластины (далее МКП) и фосфорного экрана. Для стробирования ЭОП используется управляющее напряжение между фотокатодом и входом МКП, которое обеспечивает включение и выключение ЭОП. По команде блока управления импульсный генератор, входящий в состав затворного модуля, формирует импульс с длительностью, равной времени экспозиции кадра. В течение этого промежутка времени открывается переход – фотокатод-МКП, – и на выходном экране ЭОП формируется изображение частиц взвеси. Блок питания, входящий в состав затворного модуля, обеспечивает напряжения смещения между фотокатодом и МКП, напряжения переноса между МКП и выходным экраном, напряжения между входом и выходом МКП (отвечающее за усиление входного сигнала), а также напряжения затворного импульса, инициируемого блоком управления.

Принцип действия электронно-оптического преобразователя в качестве электронного затвора при стробировании по участку «фотокатод – МКП» показан на рис. 3.

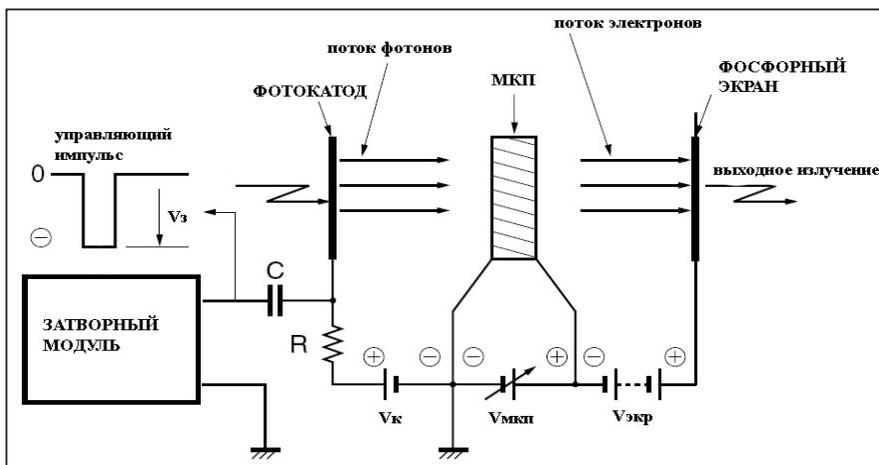


Рис. 3. Принцип действия электронно-оптического преобразователя в качестве электронного затвора

В ждущем режиме напряжение V_k между фотокаатодом и входом микроканальной пластины составляет +30 В, и переход «фотокаатод – МКП» закрыт. После подачи импульса V_z , генерируемого блоком управления, между фотокаатодом и микроканальной пластиной образуется ускоряющее электрическое поле, и электронно-оптический преобразователь переходит в открытое состояние на время, равное длительности затворного импульса, тем самым обеспечивая необходимое время регистрации процесса. Затворный модуль обеспечивает требуемые параметры импульса: амплитуда напряжения – 200 В, длительность – 4 мкс. Итоговое время экспозиции зависит от инерционности люминофора, который нанесен на экран. Время послесвечения для люминофора P43 или P20 составляет 1 мс, что соответствует возможностям существующих фотоприемников (ПЗС или КМОП матриц).

3. Блок регистрации изображений. Задачей данного блока является оцифровка полученного от электронно-оптического преобразователя сигнала и формирование итогового изображения. Основным элементом данного блока является камера со светочувствительной матрицей. Принцип работы блока регистрации заключается в следующем: изображение, полученное на выходном экране электронно-оптического преобразователя, с помощью оптического соединителя переносится на поверхность светочувствительной матрицы. Далее с помощью сопутствующей электроники происходит оцифровка данного сигнала и формирование итогового изображения. Важной деталью при этом является то, что время накопления заряда светочувствительной матрицы не должно быть больше времени послесвечения экрана электронно-оптического преобразователя. Иными словами, блок регистрации изображений должен обеспечить время экспозиции кадра не больше времени послесвечения выходного экрана. В разрабатываемом приборе применяется специализированная система ввода изображения «ВИДЕОСКАН 205», производитель – ЗАО «НПК ВИДЕОСКАН» г. Москва, Россия. Характеристики представлены на рис. 4.

4. Система подсветки. Так как измерения будут проводиться в дневное время на глубинах до 10 м, где присутствует естественное освещение, и, кроме

того, в состав прибора входит электронно-оптический преобразователь, являющийся по своей сути усилителем яркости, особых требований к системе подсветки нет. Однако значения яркости фона и частиц взвеси находятся приблизительно в одном и том же диапазоне и, как следствие, полученные снимки могут иметь низкую контрастность. Поэтому применение подсветки в данном случае даст возможность получить более высококонтрастные снимки. Так как регистрации будут подвергаться частицы, находящиеся непосредственно перед илюминатором, и необходимо, чтобы на итоговом изображении

отсутствовали тени частиц, в разрабатываемом приборе будет применяться круговая подсветка, состоящая из импульсных светодиодов, либо омегаобразная импульсная лампа-вспышка.

Спецификация	ВИДЕОСКАН-205-USB
Тип матрицы	SONY ICX205AL (монохром) или ICX205AK (цвет)
Разрешение (пикселей)	1392*1040
Размер пикселя (мкм)	4,65 * 4,65
Размер матрицы (дюйм/мм)	1/2 (6,32 * 4,76)
Допустимые режимы синхронизации	Внутренняя, внешняя, программная
Разрядность АЦП (бит/пиксель)	12
Максимальная кадровая частота	7,7 Гц
Длительность экспозиции	от 3,5 мкс до 110 сек
Тип интерфейса	USB 2.0
Крепление объектива	C-Mount, CS
Рабочая температура	от 0 до +50С

Рис. 4. Характеристики видеокамеры «ВИДЕОСКАН 205» [10]

5. Блок управления. Основной задачей данного блока является обеспечение синхронной работы всех компонентов прибора. Главным элементом блока управления является микроконтроллер ATmega 8. При включении питания с помощью программного обеспечения происходит инициализация микроконтроллера: настраиваются порты ввода/вывода, таймеры, устанавливается стек. Одновременно вспышка, затворный модуль и видеокамера автоматически переходят в ждущий режим, ожидая синхроимпульса от управляющего контроллера. Далее, по команде оператора, контроллер запускает вспышку, на время соответствующее длительности регистрации изображения видеокамерой. Длительность вспышки не является основополагающим параметром и может выбираться произвольно, так как длительность экспозиции кадра регулируется затворным модулем. Через 1 мкс контроллер формирует синхроимпульс для запуска затворного модуля на время, равное 4 мкс (длительность экспозиции кадра), вследствие чего на фосфорном экране электронно-оптического преобразователя формируется изображе-

ние. Через 4 мкс после запуска затворного модуля контроллер подает команду для переключения камеры в режим регистрации изображения со временем экспозиции, равным 1 мс. Длительность регистрации изображения камерой соответствует времени послесвечения фосфорного экрана электронно-оптического преобразователя. Далее полученное изображение автоматически сохраняется на карту памяти и передается по линии связи для дальнейшей обработки.

6. Блок питания. Обеспечивает питание всех элементов прибора: системы подсветки, электронно-оптического преобразователя с затворным модулем, блока управления, блока регистрации изображений.

Таким образом, создание данного фоторегистратора, позволит реализовать описанную выше методику и решить поставленную задачу: получить репрезентативные данные о концентрации и размерном составе взвеси при измерениях *in situ*. Для верификации разработанного метода был сконструирован специальный испытательный стенд с фоторегистратором, который позволил апробировать методику получения мгновенных изображений и отработать на их основе разработанное программное обеспечение для получения характеристик взвеси.

В основе работы данного стенда лежит метод, основанный на использовании кратковременной засветки исследуемого объекта. Сущность метода заключается в следующем: частицы взвеси перемещаются в светоизолированной емкости, к которой через иллюминатор подсоединен фоторегистратор, состоящий из зеркального фотоаппарата с объективом и управляемой системы импульсной подсветки. По команде оператора открывается затвор фотоаппарата на время 1 с, и далее система подсветки генерирует короткий световой импульс длительностью 4 мкс. Далее происходит регистрация изображения матрицей фотоаппарата и, так как регистрируемый объем является светоизолированным, то результирующее изображение формируется только в течение того времени, когда частицы освещались системой подсветки. Таким образом, полученное итоговое время экспозиции будет соответствовать длине светового импульса вспышки и составлять 4 мкс.

Испытательный стенд состоит из бака объемом 1 м³. В корпусе бака предусмотрены отверстия с вентилями, расположенными на разных горизонтах от дна и позволяющие осуществлять отбор проб для определения концентрации и размерного состава взвеси с помощью стандартных, лабораторных методов. Для получения фотоизображений водной среды используется фоторегистратор, который производит регистрацию изображений через герметичный иллюминатор. Взвешивание – взмучивание песка обеспечивается насосом. Принцип взвешивания заключается в следующем: насос с постоянной скоростью подает воду в придонную область полностью наполненного водой бака. Из системы отверстий, расположенных на дне ёмкости горизонтальные струи воздействуют на песок, который взмучивается и поднимается над дном бака. Вытесняемая из ёмкости вода возвращается в насо-

сную емкость. Так как скорость перекачки воды насосом является постоянной, то через некоторое время устанавливается стабильное состояние с определенным распределением концентрации взвеси по вертикали, соответствующее заданной производительности насоса и параметрам взвешиваемого донного материала. Как показали проведенные испытания созданный испытательный стенд позволяет получить условия для проведения экспериментов близкие к реальным, с точки зрения динамики процесса взвешивания донного материала.

Таким образом, созданный испытательный стенд позволяет получить условия для проведения экспериментов близкие к реальным, с точки зрения динамики процесса взвешивания донного материала.

5. Апробация результатов исследований

В ходе проведения экспериментов были получены массивы изображений водной среды. Эксперименты выполнялись с использованием созданного испытательного стенда, описанного выше. В качестве материала для работы стенда, для максимального приближения условий эксперимента к реальным, использовался морской песок. Далее, в результате проведенных с помощью разработанного программного обеспечения необходимых вычислений, были получены данные о концентрации взвеси, которая составила 2.05 г/л.

Также были получены распределения частиц по фракциям, включающим в себя размеры частиц диаметром от 100 мкм до 800 мкм с шагом в 100 мкм [11]. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Распределения частиц по размерам

Вид распределения	Диаметр частиц, мкм					
	до 200	200–300	300–400	400–500	500–600	более 600
Масса частиц, (мг)	1,61	3,97	3,08	0,96	0,8	0,62
Процентное соотношение, (%)	14,6	35,9	27,9	8,7	7,2	5,6
Количество частиц, (шт)	306	240	69	9	5	2

Для подтверждения и проверки результатов вычислений одновременно с регистрацией снимков проводился отбор проб. Анализ проб с помощью стандартных аттестованных методик путем взвешивания и седиментации показал, что разработанный метод является работоспособным. Расхождения в итоговых средних значениях концентрации и построенных распределениях по размерам не превышает 10 %, что является хорошим результатом для процесса с чрезвычайно высокой временной изменчивостью.

6. Выводы

В ходе выполненной работы:

1. Произведен анализ современных средств и методов для лабораторных и натуральных исследований концентрации и размерного состава взвешенного в воде вещества. Установлено, что большинство применяе-

мых на сегодняшний день методов имеют возможность проведения исследований только в лабораторных условиях. Существующие приборы для измерений *in situ*, невозможно использовать в прибойной зоне, в области высоких концентраций взвеси и неоднородного размерного состава.

2. Разработана методика получения данных о концентрации и размерном составе взвешенного в морской воде вещества, основанная на обработке его фотоизображений.

3. Выполнена разработка фоторегистратора, принцип действия которого основан на использовании электронно-оптического преобразователя в качестве электронного затвора.

4. Создан специализированный стенд для взвешивания (взмучивания) песчаного материала, позволяю-

щий получить условия для проведения экспериментов близкие к реальным, с точки зрения динамики процесса взвешивания донного материала.

5. Выполненный анализ проб, с помощью стандартных аттестованных методик показал, что разработанный метод является работоспособным. Расхождения в итоговых средних значениях концентрации и построенных распределениях по размерам не превышает 10 %, что является хорошим результатом для косвенных методов определения искомых параметров среды при их чрезвычайно высокой временной изменчивости.

Результаты работы использованы в научно-исследовательской деятельности Морского гидрофизического института: Акт внедрения № 3/09 от 3.09.2012 г.

Литература

1. Крыленко, М. В. Исследование механизмов формирования поля концентрации взвешенных песчаных наносов в береговой зоне [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 25.00.28 „Океанология” / М. В. Крыленко. – Геленджик, 2007. – 22 с.
2. Kachel, V. Electrical resistance pulse sizing: Coulter sizing [Text] / V. Kachel, M. R. Melamed, T. Lindmo, M. L. Mendelsohn. – In: Flow Cytometry and Sorting, 2nd ed., , eds. New York: Wiley, 1990. – P. 45–81.
3. Pecora, R. Dynamic Light Scattering – Applications of Photon Correlation Spectroscopy [Text] / R. Pecora. – Springer-Verlag, New York, 1985. – 434 p.
4. Brown, W. Dynamic Light Scattering: the Method and Some Applications [Text] / W. Brown. – Oxford, 1993. – 752 p.
5. Шифрин, К. С. Введение в оптику океана [Текст] / К. С. Шифрин. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 280с.
6. Haltrin, V. I. Polar nephelometer for sea truth measurements [Text] / V. I. Haltrin, M. E. Lee, O. V. Martynov. – Proc. of 2 nd Intern. airborne remote sensing Conf. – San Francisco, 1996. – P. 444–450.
7. Davey, H. M. Variable selection and multivariate methods for the identification of microorganisms by flow cytometry [Text] / H. M. Davey, A. F. Jones, A. D. Shaw, D. B. Kell. – Cytometry. 1999. – Vol. 35, Issue 2. – P. 162–168. doi: 10.1002/(sici)1097-0320(19990201)35:2<162::aid-cyto8>3.0.co;2-u
8. Косьян, Р. Д. Динамические процессы береговой зоны моря [Текст] / Косьян Р. Д., Подымов И. С., Пыхов Н. В. – М.: Научный мир, 2003. – 320с.
9. Антоненков, Д. А. Метод получения изображений взвеси для определения ее концентрации и размерного состава [Текст] / Д. А. Антоненков // Системы контроля окружающей среды. – 2011. – Вып. 15. – С. 43–46.
10. Спецификация Видеоскан-205 [Электронный ресурс] / компания НПК «Видеоскан». – Режим доступа : <http://videoscan.ru/page/748>. – 22.07.2014 г. – Видеоскан-205.
11. Антоненков, Д. А. Программная обработка изображений среды с целью определения размерного состава и концентрации частиц взвеси [Текст] / Д. А. Антоненков. – Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2011. – Вып. 25. – С. 382–396.